

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА НАДЕЖНОСТЬ ВИТКОВОЙ
ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ МАШИН
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

А. Я. ЦИРУЛИК, И. А. ВОЛКОМИРСКИЙ, В. Н. ПОПОВ,
Н. М. НОВОСЕЛОВА

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин)

Ресурсные испытания машин серии П1—6 габаритов, проводимые в течение ряда лет на заводе «Электромашина» (г. Прокопьевск), показали, что большая интенсивность отказов якорных обмоток наблюдается в первые 2—6 тысяч часов работы, то есть имеет место период приработки. Все отказы относились к витковой изоляции. Известно, что отказы в период приработки обусловлены наличием скрытых дефектов изоляции обмотки, обусловленных некоторыми конструктивно-технологическими факторами. Для повышения надежности обмоток машин требуется выявить такие факторы, оценить степень влияния каждого из них и найти пути ослабления их влияния.

Анализ априорных сведений позволяет выделить следующие основные факторы, понижающие надежность витковой изоляции.

1. Повреждения (или микроповреждения) витковой изоляции, наносимые при намотке секций на шаблон, укладке секций в пазы якоря, рихтовке лобовых частей обмотки и т. п. Исследования влияния технологии на повреждаемость изоляции, которые были проведены нами на заводе, показали, что при существующей культуре производства обмоток повреждаемость витковой изоляции эмальпроводов невысока, а проводов с волокнистой изоляцией — отсутствует.

2. Высокий коэффициент заполнения паза, способствующий увеличению повреждаемости витковой изоляции при закладке обмотки в пазы.

3. Наличие «крестов» проводников в пазовой и лобовой частях секций, приводящих к продавливанию или истиранию изоляции при работе машины под действием вибраций и центробежных сил.

4. Смещение междуслойных прокладок в пазу и в лобовой части, в результате чего приходят в контакт проводники обоих слоев и витковая изоляция оказывается под воздействием большого электрического напряжения.

5. Плохая степень цементации проводников обмотки пропитывающим лаком, обуславливающая возможность взаимного перемещения проводников при работе машины под воздействием вибраций и центробежных сил, температурных расширений и т. п. и приводящая к истиранию изоляции на «крестах». Плохая цементация может быть обусловлена не строгим соблюдением режимов пропитки и сушки и не оптимальностью самих режимов, заданных технологией.

Для исследования степени влияния на надежность витковой изоляции были выбраны основные факторы:

$x_1 = K_3$ — коэффициент заполнения свободной площади паза;

x_2 — наличие «крестов» проводников;

x_3 — уровень цементации обмотки.

Задача определения степени влияния нескольких факторов решается методами планирования многофакторных экспериментов [1], поэтому был составлен и реализован полный факторный эксперимент из восьми опытов для трех независимых переменных (табл. 1).

Таблица 1

№ опытов	x_1 коэффициент за- полнения паза	x_2 наличие «крестов» в об- мотке	x_3 Уровень цементации обмотки
1	— (большой)	— (много)	— (высокий)
2	— (малый)	— »	— »
3	— (большой)	— »	— (низкий)
4	— (малый)	— »	— »
5	— (большой)	— (мало)	— (высокий)
6	— (малый)	— »	— »
7	— (большой)	— »	— (низкий)
8	— (малый)	— »	— »

Исследования проводились на машинах ПЗ2 с якорными обмотками, выполненными из проводов марок ПЭТВ и ПСДКТ, поэтому план по табл. 1 был реализован отдельно для каждого типа изоляции обмотки якоря. «Большой» (+) коэффициент заполнения паза равен 0,757 для обмотки из провода ПЭТВ и 0,752 — для обмотки из провода ПСДКТ. «Малый» (—) коэффициент заполнения равен соответственно 0,547 и 0,57. Диаметр обмоточного провода был выбран с учетом получения «малого» коэффициента заполнения паза, а «большой» коэффициент заполнения был получен закладкой в пазы дополнительных пассивных секций с нужным числом проводников.

Количество «крестов» на уровне (+) обеспечивалось искусственным спутыванием проводников, а на уровне (—) — тщательной укладкой обмотки по возможности без «крестов». Эту работу выполняла весьма опытная обмотчица.

Цементация на уровне (+) обеспечивалась трехкратной пропиткой и тщательной сушкой, а на уровне (—) — однократной пропиткой, обеспечивающей тонкую лаковую пленку.

Каждому опыту табл. 1 соответствует один якорь, изготовленный в соответствии с условиями, заданными таблицей. В качестве выходной характеристики не может быть взята непосредственно надежность изоляции, так как в противном случае требовалось бы проводить испытания каждой машины до отказа обмотки якоря, что требует длительных испытаний. Кроме того, потребовалось бы испытать большое число машин, чтобы объективно оценить уровень надежности. Поэтому в качестве выходной характеристики принимались параметры распределения пробивного напряжения витковой изоляции каждого якоря, позволяющие оценить состояние изоляции и, следовательно, связанные с надежностью изоляции. Для того, чтобы многократно испытать витковую изоляцию каждого якоря, в секции обмотки были заложены испытательные витки (по четыре на секцию), концы которых выводились в лобовой части обмотки, отгибались на изолированную лобовую часть и бандажировались вместе с обмоткой. Все машины подвергались ускоренным испытаниям в течение 500 часов, при повышенной рабочей

температуре (160°C — для якорей с обмоткой из провода ПЭТВ и 200°C — для якорей с обмоткой из провода ПСДКТ), повышенных вибрациях, и при наличии реверсов. В этих испытаниях должны были проявиться отрицательные воздействия на изоляцию заложённых при изготовлении якорей входных факторов. Степень этих воздействий и, следовательно, степень изменения свойств изоляции в разных опытах должны быть различными, так как различны уровни факторов.

После окончания ускоренных испытаний машин витковая изоляция обмоток якорей испытывалась переменным напряжением на пробой путем приложения напряжения между обмоткой (через коллектор) и одним из испытательных витков. Испытательные витки выполнялись из того же провода, что и обмотка, поэтому можно считать, что испытанию таким способом подвергалась витковая изоляция пары витков обмотки на длине примерно шести длин витка секции.

Для проведения испытаний якорь разбандажировался, концы испытательных витков поднимались и к ним присоединялись электроды-проводники от испытательной установки. Якорь в вертикальном положении погружался в трансформаторное масло так, чтобы все испытательные проводники погрузились в масло. Это оказалось необходимым во избежание перекрытий вне обмотки. На каждый испытательный проводник напряжение подавалось дважды, чтобы затем можно было бы выделить случаи, соответствующие перекрытиям по микротрещинам в изоляции, по методике, изложенной в статье [2]. На каждом якоре получено по 72 двойных значения напряжения пробоя. По результатам испытания изоляции были построены точечные диаграммы распределения пробивного напряжения и вычислены параметры, характеризующие состояние изоляции каждого якоря. Средние значения напряжения почти не изменяются от опыта к опыту и не характеризуют состояния изоляции. Хорошей разрешающей способностью обладает такой параметр, как вероятность появления малых пробивных напряжений по сравнению со средним напряжением, то есть вероятность появления дефектов изоляции. Для якорей с обмоткой из провода ПЭТВ была вычислена вероятность P_3 появления напряжения пробоя, меньшего 3 кВ, а для якорей из провода ПСДКТ — вероятность $P_{1,1}$ появления напряжения пробоя, меньшего 1,1 кВ. Для провода ПЭТВ была вычислена также дефектность изоляции λ , равная числу микротрещин на единице длины провода. Было установлено, что параметры λ и P_3 обладают равной разрешающей способностью. В табл. 2 представлены значения выходных параметров P в каждом опыте для обеих марок обмоточного провода.

Таблица 2

№ опы- тов	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	ПЭТВ P_3	ПСДКТ $P_{1,1}$
1	+	+	+	+	+	+	0,378	0,0395
2	—	+	+	—	—	+	0,174	0,0141
3	+	—	+	—	+	—	0,142	0,0506
4	—	—	+	+	—	—	0,016	0,0140
5	+	+	—	+	—	—	0,486	0,3590
6	—	+	—	—	+	—	0,414	0,2390
7	+	—	—	—	—	+	0,214	0,0861
8	—	—	—	+	+	+	0,217	0,0985

По данным табл. 2 построены диаграммы рассеяния параметров P_3 и $P_{1,1}$ (рис. 1, а, б) и методом регрессивного анализа вычислены

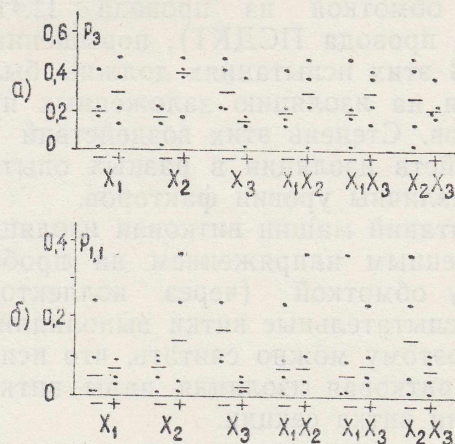


Рис. 1. Диаграмма рассеяния выходного параметра при варьировании входных факторов: а) для якорей с обмоткой, выполненной проводом ПЭТВ; б) для якорей с обмоткой, выполненной проводом ПСДКТ

также зависимости этих параметров от входных факторов, которые имеют следующий вид:

$$P_3 = 0,255 + 0,05 \cdot x_1 + 0,108 \cdot x_2 - 0,078 \cdot x_3 + 0,019 \cdot x_1 x_2 + 0,033 \cdot x_1 x_3 + 0,0094 \cdot x_2 x_3; \quad (1)$$

$$P_{1,1} = 0,722 + 0,212 \cdot x_1 + 0,503 \cdot x_2 - 0,831 \cdot x_3 + 0,151 \cdot x_1 x_2 - 0,057 \cdot x_1 x_3 - 0,531 \cdot x_2 x_3. \quad (2)$$

На основании (1) и (2) изменения параметров P при изменении входных параметров можно определить из выражений:

$$\Delta P_3 = 10^{-4} [25 \cdot \Delta x_1 + 116 \cdot \Delta x_2 + 61 \cdot \Delta x_3 + 3,6 \Delta(x_1 x_2) + 10,9 \cdot \Delta(x_1 x_3) + 0,88 \cdot \Delta(x_2 x_3)]; \quad (3)$$

$$\Delta P_{1,1} = 10^{-3} [45 \cdot \Delta x_1 + 253 \cdot \Delta x_2 + 690 \cdot \Delta x_3 + 22,7 \cdot \Delta(x_1 x_2) + 3,3 \cdot \Delta(x_1 x_3) + 280 \cdot \Delta(x_2 x_3)] \approx 10^{-3} [253 \cdot \Delta x_2 + 690 \cdot \Delta x_3 + 280 \cdot \Delta(x_2 x_3)]. \quad (4)$$

Анализируя выражения (3) и (4) и рисунки 1, а, б, можно сделать следующие выводы. Величина коэффициента заполнения паза (x_1), наличие «крестов» в секциях обмотки (x_2) и уровень цементации обмотки лаком (x_3) оказывают существенное влияние на дефектность эмалевой изоляции. Заметим, что чем меньше параметры P , тем меньше уровень дефектности изоляции и выше ее надежность. С уменьшением коэффициента заполнения паза и количества «крестов» и с увеличением степени цементации обмотки качество растет.

На дефектность волокнистой изоляции коэффициент заполнения паза практически не оказывает влияния, но влияют «кресты» и особенно сильно влияет степень сцементированности обмотки. При плохой цементации эта изоляция, очевидно, склонна к истиранию на крестах, что приводит к появлению дефектов изоляции при работе машины. Интересно, что качественная цементация обмотки ослабляет отрицательное влияние «крестов», о чем свидетельствует большой коэффициент при $x_2 x_3$ с отрицательным знаком в выражении (2).

Снижение коэффициента заполнения паза для повышения надежности эмалевой витковой изоляции обмоток не может быть рекомендовано, так как это снижает уровень использования машин. Повышение надежности эмалевой и волокнистой изоляции может быть достигнуто за счет уменьшения числа «крестов» проводников обмотки путем повышения культуры обмоточных работ и применения технологии, исключая образование «крестов», а также за счет повышения степени

сцементированности обмотки путем применения лаков с хорошей цементирующей способностью и оптимизации режимов пропитки и сушки обмоток по критерию качества цементации.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., «Наука», 1965.
2. А. П. Матялис, Э. К. Стрельбицкий. Метод оценки дефектности изоляции низковольтных электрических машин. Изв. ТПИ, т. 229, 1971.